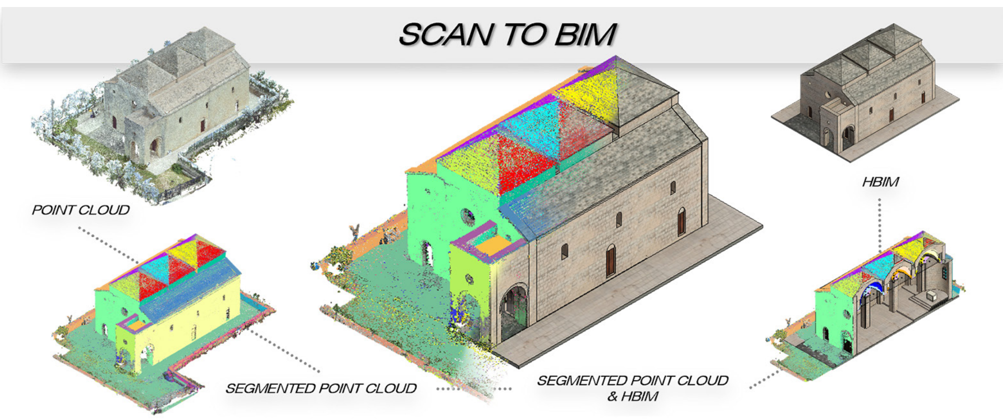
Sensor Data Fusion per i processi *Scan to BIM*. La Chiesa Ognissanti di Valenzano, Bari

Cesare Verdoscia
Michele Buldo
Riccardo Tavolare
Elena Cabrera-Revuelta
Antonella Musicco

Abstract

Il settore del patrimonio culturale e, nello specifico, quello architettonico stanno vivendo una fase di transizione digitale, dettata da una sensibilità verso tecniche e tecnologie innovative che consentano da un lato la digitalizzazione, la conservazione e valorizzazione del bene, dall'altro la possibilità di individuare la risposta prestazionale alle richieste del fruitore, cercando di ottimizzare i processi di acquisizione e gestione dei dati acquisiti. In questo quadro si inserisce il lavoro presentato, frutto di una continua ricerca per l'adozione di un protocollo unificato sperimentato nel rilievo architettonico della Chiesa di Ognissanti di Cuti in Valenzano, abbazia dal tipico impianto monastico-benedettino dell'XI secolo. Lo sviluppo di una metodologia *Scan to BIM* ha permesso di combinare dati derivanti da diverse tipologie di misurazione (scansione laser, fotogrammetria, GNSS), e di gestirli durante le fasi di elaborazione, precedute da un'attenta e consapevole pianificazione del rilievo, con l'obiettivo di operare in totale sicurezza nel cantiere di rilievo. Processi di *subsampling*, georeferenziazione mediante *Ground Control Points* e automatismi di segmentazione di nuvole di punti mediante algoritmi *model-fitting* si sono rivelati un fedele e valido supporto alla modellazione parametrica dell'edificio in ambito *Heritage Building Information Modelling*, soddisfacendo i prerequisiti di qualità geometrica e informativa preassegnati.

Parole chiave
Sensor Data Fusion, sicurezza sul lavoro, nuvola di punti, segmentazione automatica, Scan to BIM



Metodologia *Scan to BIM* nell'ambito dei Beni Culturali.

doi.org/10.3280/oa-1016-c466

Introduzione

L'eterogeneità degli edifici storici richiede una grande varietà di tecniche di rilievo, in grado di fornire informazioni complete, che ne rispettino la complessità geometrica, il livello di dettaglio richiesto dalle esigenze progettuali, e che siano flessibili rispetto allo stato dei luoghi.
In termini di precisione, risoluzione e affidabilità dei dati raccolti, notevoli progressi sono stati raggiunti nell'ambito delle tecnologie digitali basate sui sistemi LiDAR e CRP (*Close Range Photogrammetry*) poiché consentono di ottenere ricostruzioni tridimensionali sotto forma di nuvole di punti, fornendo un supporto efficace per l'archiviazione digitale e ulteriori analisi.
In letteratura, sono stati condotti diversi studi sull'utilizzo di strumenti differenti, quali laser scanner [Edl et al. 2018, pp.1-5], sistemi UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) [Adami et al. 2019, pp.15-21] e fotocamere, professionali e non, favorendone la diffusione anche tra gli operatori non esperti.
Per la complessità dei manufatti storici e la varietà dei contesti in cui sorgono, si predilige un approccio integrato tra diversi sensori [Yang et al. 2022, pp.1-25] che richiede la fusione di tutti i dati provenienti da fonti di acquisizione diverse in un sistema di coordinate comune, attraverso un processo di georeferenziazione [Rifandi et al. 2013, pp.1-12; Schuhmacher, Böhm 2005, pp.1-7], introducendo notevoli vantaggi rispetto alla registrazione in un sistema di coordinate locali arbitrario.
Tra i sistemi di coordinate comuni possono essere utilizzati sistemi di coordinate nazionali, internazionali o globali come il GNSS (*Global Navigation Satellite System*) utilizzato per la geolocalizzazione e la navigazione, basato sul sistema geodetico mondiale stabilito nel 1984 (WGS84: *World Geodetic System* 1984).
Data la grande dimensione, la complessità e la varietà delle nuvole di punti, che si differenziano, a seconda dell'oggetto rilevato, per densità, distribuzione dei punti, valori RGB, ecc., per l'analisi e l'estrazione dei dati di interesse (componenti architettonici, sezioni, ecc.) l'utilizzo di algoritmi automatici è preferibile alle procedure di annotazione manuale lunghe e talvolta imprecise [Nguyen, Le 2013, pp. 5-10].
I più diffusi attualmente sono quelli basati su algoritmi di *Machine Learning* [Grilli et al. 2017, pp. 339-344] che favoriscono processi automatizzati di segmentazione, classificazione di porzioni di modello o i sistemi matematici come il RANSAC [Schnabel et al. 2007, pp. 214-226] che permettono di estrarre forme geometriche dalle nuvole di punti assimilandole a forme primitive (piani, cilindri, sfere, ecc.).
Negli ultimi anni è in costante aumento l'utilizzo di sistemi informativi per la documentazione, l'archiviazione e l'analisi del patrimonio architettonico. L'approccio *Historic Building Information Modelling* (HBIM) si propone come nuovo paradigma per la rappresentazione tridimensionale e la gestione dell'intero ciclo di vita degli edifici in quanto consente un *workflow* multidisciplinare in grado di ottimizzare il consumo di risorse, costi e tempi, utilizzando strumenti flessibili e personalizzabili [Croce et al. 2021, pp. 98-108] e comprendendo anche l'informatizzazione degli oggetti attraverso parametri.
La ricerca affronta il tema del rilievo integrato e della modellazione BIM nell'ambito del patrimonio costruito trovando una soluzione applicativa nello studio della chiesa di Ognissanti di Cuti in Valenzano di Bari (Puglia, Italia), ultimo edificio di un'importante abbazia benedettina costruita nell'XI secolo, il cui impianto si caratterizza nella successione di tre moduli volumetrici a cupola in asse della navata centrale (fig. 1).

Metodologia

Nell'ambito della digitalizzazione di architetture complesse, raramente viene eseguito un rilievo strumentale accurato mediante un unico sistema di sensori. È pratica comune integrare diverse misurazioni provenienti da diversi sensori e da diverse stazioni attraverso un processo che viene definito *Sensor Data Fusion*.
L'approccio adottato, incentrato su elaborazioni da rilievo integrato finalizzate alla realizzazione di un modello in ambiente H-BIM, si è sviluppato metodologicamente su procedure

internazionali [Bryan et al. 2009; Di Giulio et al. 2017, pp. 251-257; Stylianidis 2019, pp. 1-130] definendo diversi livelli applicativi che hanno riguardato gli aspetti relativi alla pianificazione, alla sicurezza, all'acquisizione, all'elaborazione ed esportazione dati, e per ultimo alla modellazione (fig. 2).

Pianificazione del rilievo

Nella fase iniziale di pianificazione, individuati i requisiti e le finalità del progetto, sono stati previsti i sopralluoghi conoscitivi e definito il livello di approfondimento informativo e di accuratezza morfometrica dei dati mediante alcuni indicatori di qualità: il LOA (*Level of Accuracy*), tolleranza (in mm) della misura; il LOD (*Level of Detail*), dimensione minima (in mm2) degli elementi rilevati legata alla densità della nuvola di punti [Aryan et al. 2021, pp.1-14]; il LOC (*Level of Completeness*) percentuale di superficie rilevata [Biswas et al. 2015, pp.1-8].



Fig. 1. Chiesa di Ognissanti di Cuti in Valenzano di Bari (Puglia, Italia).

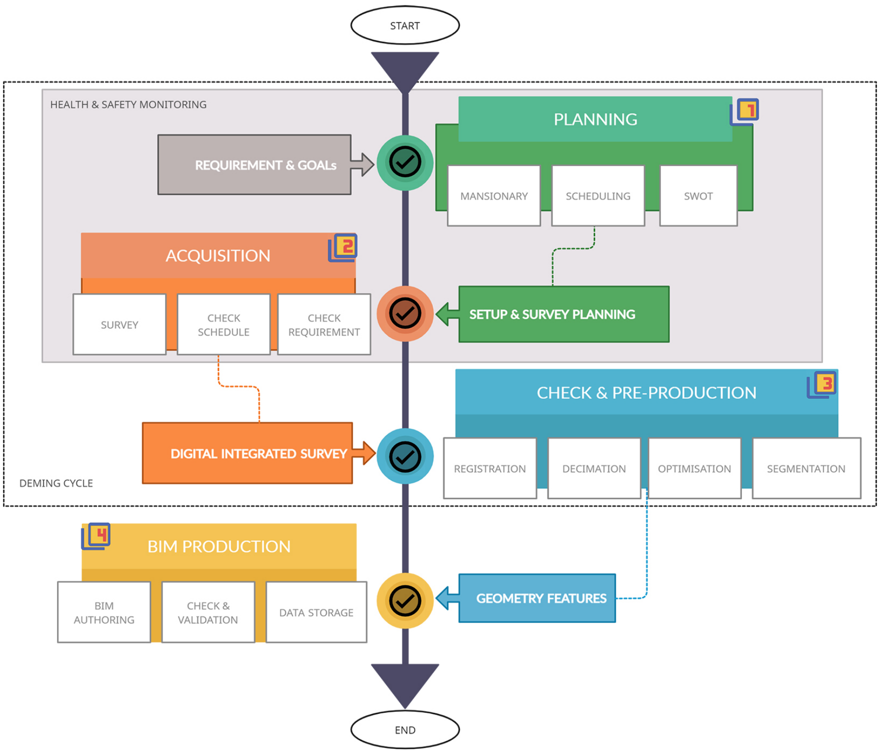


Fig. 2. *Workflow* operativo.

È stato pianificato un rilievo completo e integrato dell'edificio (perimetro 125 m, area di 825 m2) (fig. 3), mediante diverse tipologie di strumentazione: laser scanner terrestre (metodologia *range-based*), fotogrammetria aerea da drone (metodologia *image-based*), rilievo GNSS (approccio *sensor-driven*).
In dettaglio, è stato utilizzato un laser scanner CAM2® FARO Focus 3D 120, definendo le stazioni di ripresa in funzione delle geometrie degli spazi e degli elementi (chiusi/aperti, concavi/convessi), considerando le caratteristiche operative dello strumento, l'angolo di acquisizione e i criteri fondamentali per la riduzione di zone d'ombra.
La pianificazione del rilievo fotogrammetrico con un drone DJI Spark (fotocamera da 12 MPx), ha valutato la migliore illuminazione naturale e le condizioni metereologiche (ore centrali di giornate nuvolose). Tre i voli previsti rispettivamente per scatti: nadirali a griglia singola, a 45° su percorso circolare, a 30° lungo il perimetro dell'edificio.
La georeferenziazione ha previsto un rilievo topografico con un ricevitore GNSS Tersus Oscar.

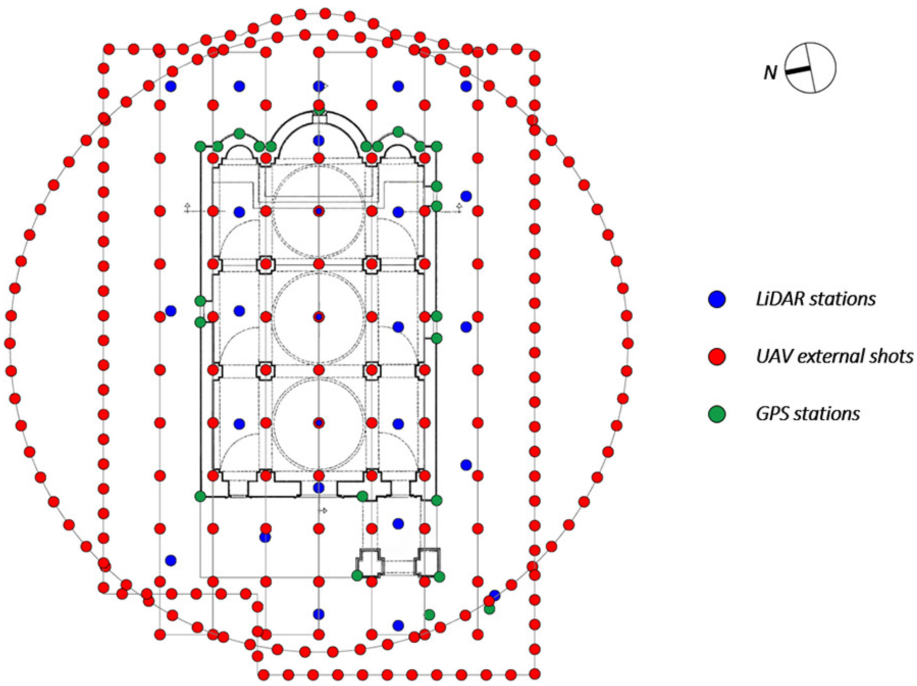


Fig. 3. Pianificazione del rilievo mediante strumentazione LiDAR, UAV e GPS.

Salute e sicurezza

Le attività di rilievo possono rientrare nelle fasi di *Risk Assessment* finalizzate all'analisi dei pericoli per tutte le operazioni di cantierizzazione e costruzione.
L'importanza di tale approccio, oltre a garantire l'incolumità degli operatori coinvolti, può influenzare il budget e, più in generale, la qualità dei prodotti e processi [Neeraj, Balasubramanian 2015, pp. 68-72].
La campagna di rilievo può rappresentare un ambiente di lavoro complesso e dinamico in cui variano le vulnerabilità e le condizioni prefigurate delle attività [Rajesh, Keshav 2022, pp. 1-7], per le quali sono necessari strumenti di coordinamento che consentano una loro organizzazione ottimizzata.
Il necessario sopralluogo conoscitivo del sito ha consentito la verifica dell'accessibilità e l'agibilità della struttura, il riconoscimento delle caratteristiche architettoniche e costruttive dell'edificio, l'individuazione di criticità ed interferenze contestuali, sia di carattere infrastrutturale che impiantistiche.
Per la pianificazione delle operazioni di rilievo integrato è stato prodotto un cronoprogramma per gli operatori con lo scopo di ottimizzare le condizioni di illuminazione naturale e artificiale, ridurre i tempi di lavoro, stabilizzare le caratteristiche contestuali in termini di sicurezza e consentire il posizionamento di target e l'individuazione dei punti notevoli (tab. 1).

Nel caso specifico, l'area, grazie ad una recinzione perimetrale è risultata essere sufficientemente confinata e sicura per tutte le operazioni di rilievo laser e di sorvolo con il drone per le quali sono state adottate le procedure di sicurezza e di valutazione previste dalla normativa Regolamento di Esecuzione (UE) n. 947/2019 e successive modifiche, mediante la ricerca di eventuali comunicazioni *NOtice To AirMen* (NOTAM) e consultazione di carte geografiche tematiche (fig. 4).

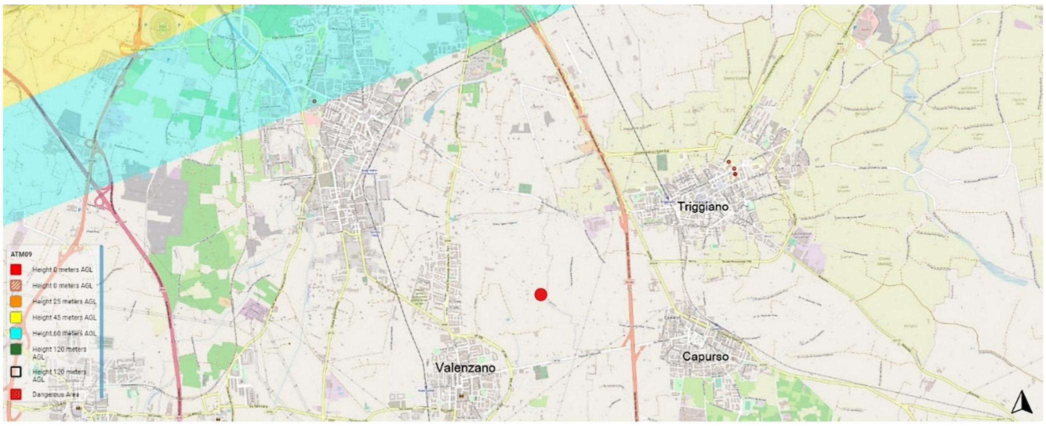


Fig. 4. Mappa dello spazio aereo con evidenza dei limiti di volo.

Tab. 1. *Planning* delle attività di rilievo simultaneo.

STEP	TEAM 1	TEAM 2
1	Rilievo fotografico esterno	Rilievo fotografico interno
2	Rilievo laser interno	Rilievo fotogrammetrico aereo
3	Rilievo laser esterno	Rilievo GNSS/GPS

Acquisizione dati

L'attività di rilievo strumentale è stata correlata al rilievo fotografico, ad annotazioni sul campo, e preceduto dalla disposizione di target e fonti di illuminazione artificiale.
In particolare, ventisei sono state le stazioni pianificate per la scansione laser: 11 interne, con una risoluzione dimensionale pari 11 Mpts e di acquisizione pari a 12.272 mm/10 m; 15 esterne con risoluzione dimensionale di 28.2 Mpts e di acquisizione pari a 7.670 mm/10 m.
L'esposizione di scansione è stata scelta in funzione della configurazione luminosa ambientale: una misurazione ponderata all'orizzonte in prossimità delle aperture, una bilanciata all'esterno.
Con il drone sono stati eseguiti 240 scatti (12 MPx) in formato JPEG, mentre con il ricevitore GPS sono stati misurati 24 punti a terra, dei quali alcuni in corrispondenza di target associati alle coordinate geografiche nel sistema di riferimento geodetico WGS84 (EPSG:4326), in gradi decimali (latitudine, longitudine) con l'aggiunta della quota ellissoidica.

Elaborazione dati

L'elaborazione dei dati LiDAR è stata eseguita con il software Autodesk Recap Pro®, mediante una registrazione manuale che ha utilizzato punti omologhi per coppie di scansioni allineate. Alla nuvola non sono stati applicati iniziali filtri di decimazione, ma è stata ripulita dai punti superflui, per un totale di 145,7 Mpts, e riferita ad un sistema di coordinate locali per l'integrazione con i dati fotogrammetrici. Quest'ultimi, elaborati con Agisoft Metashape Pro, attraverso l'inserimento di alcuni *markers* in corrispondenza dei punti misurati con il ricevitore GPS, per proporzionare il modello, e georeferenziarlo nel sistema geodetico WGS84 (EPSG:4326). Per la verifica dei parametri di accuratezza del modello, sono stati trasformati alcuni punti di appoggio (GCPs) in punti di controllo (QCPs), ottenendo un valore di accuratezza generale (0.03 m) restituita per i punti dell'intero modello, di (fig. 5).

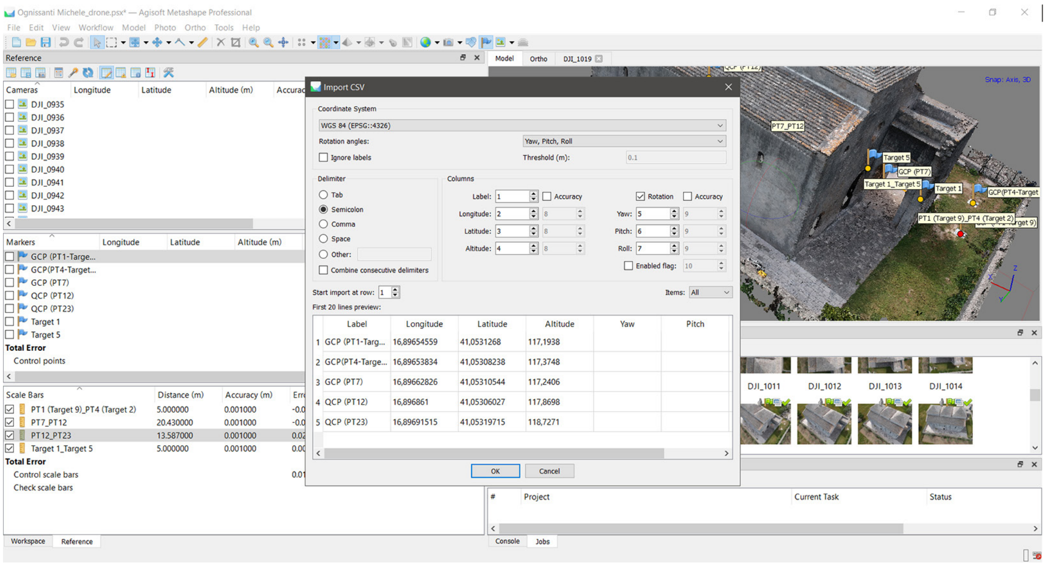


Fig. 5. Inserimento coordinate geografiche GPS e ottimizzazione dati con GCPs e QCPs.

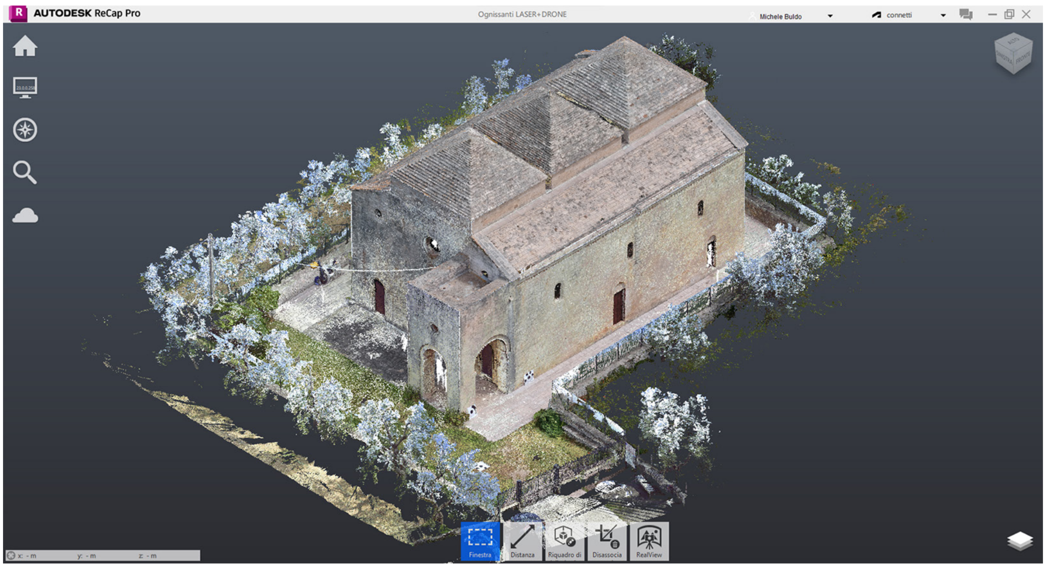


Fig. 6. Nuvola di punti integrata (dati LiDAR e fotogrammetrici).

La nuvola di punti fotogrammetrica (fig. 6) è stata successivamente integrata ai dati LiDAR con il software Autodesk Recap Pro®, mediante registrazione *targetless* per tre punti omologhi. Infine, è stata eseguita una trasformazione delle coordinate geografiche dei dati GPS in coordinate proiettate UTM, per localizzare la chiesa nel sistema EPSG:32633 – WGS 84 / UTM zone 33N (fig. 7). I GCPs sono stati raggruppati e utilizzati come punti riferimento per georeferenziare i dati *range/image-based* con il software CloudCompare (fig. 8).

Esportazione e Modellazione BIM *Authoring*

L'ottimizzazione dei dati processati, direttamente correlata al loro successivo utilizzo, ha previsto operazioni di decimazione, filtraggio, segmentazione della nuvola di punti, rispetto alla configurazione rappresentativa del contenuto (impostazioni grafiche e di colore, ecc.) e al formato dei file (.RCP, .RVT, .FBX, .OBJ, .LAS, .JPEG, ecc.).
La nuvola georeferenziata è stata dapprima sottocampionata in un intervallo di distanza punto-punto pari 0.02 m e successivamente importata in formato .LAS all'interno del software *open-source* QGIS®, per permetterne una visualizzazione, organizzazione e future analisi in ambiente GIS (*Geographic Information System*) all'interno di mappe satellitari (fig. 9).

Una delle fasi finali di elaborazione è stata finalizzata alla creazione del modello parametrico HBIM mediante un approccio metodologico di tipo *Scan to BIM*.
Sono state eseguite operazioni di segmentazione automatica della nuvola di punti mediante algoritmi di tipo *multi-RANSAC* (linguaggio PythonTM), per il riconoscimento automatico di muri piani e curvi, pavimenti e strutture voltate, riferimento per le famiglie parametriche adattive di oggetti utilizzate per la costruzione del modello (fig. 10).
In particolare, per gli elementi piani sono stati considerati tre parametri: i) il valore della distanza massima (*distance threshold*) tra i punti *inliers* e la forma ideale; ii) il numero di punti campionati (*ransac_n*); iii) il numero di iterazioni (*num_iterations*). Invece, per i punti *outliers* rilevati sulle strutture voltate e sui muri curvi, sono state utilizzate geometrie ideali sferiche (parametri *center* e *radius*), e superfici cilindriche di rotazione (*center, radius* e asse di rotazione *np.array* (1,3)).
Lo step successivo ha previsto l'importazione in Autodesk Revit® della nuvola di punti segmentata, permettendone la migliore gestione e la visione parzializzata, ottimizzando il carico computazionale in fase di modellazione. In particolare, sono state utilizzate famiglie di sistema e locali per la maggior parte degli elementi architettonici, mentre per la costruzione delle volte in muratura sono state generate famiglie parametriche (.rfa) mediante punti di posizionamento e di manipolazione dei componenti adattivi, connessi mediante spline o linee di riferimento.

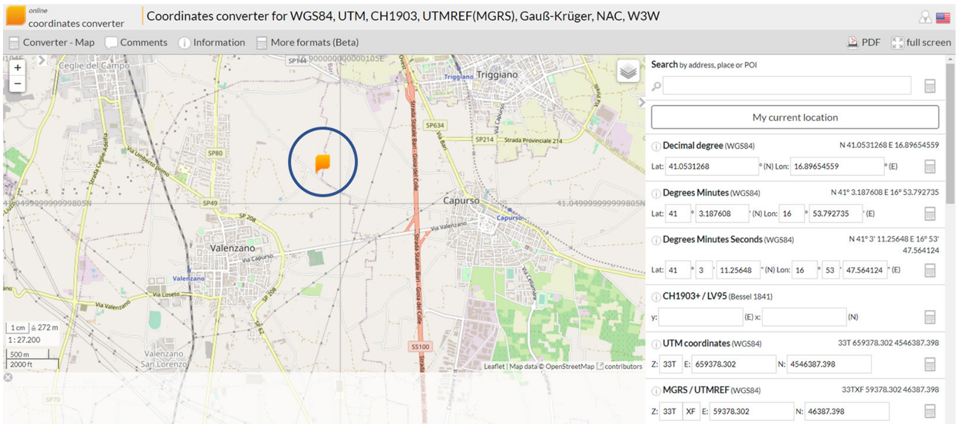


Fig. 7. Trasformazione coordinate geografiche in coordinate proiettate UTM e visualizzazione in OpenStreetMap.

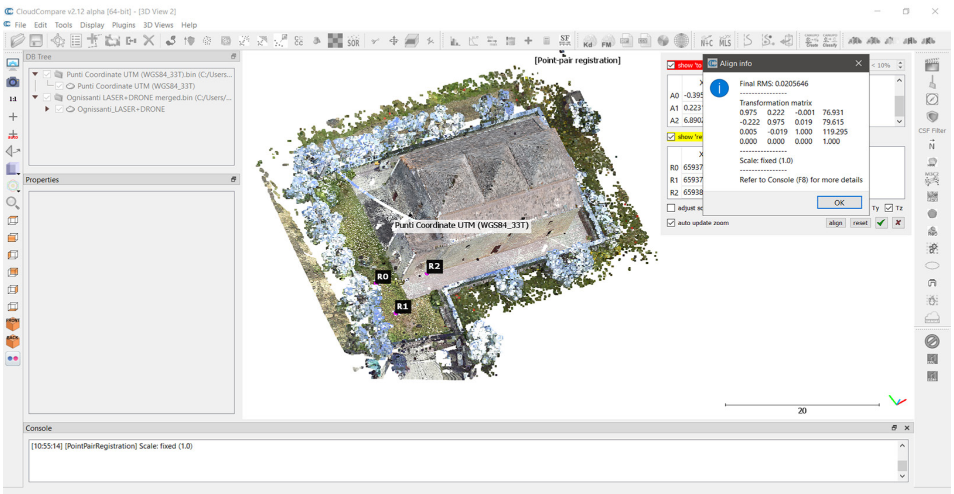


Fig. 8. . Georeferenziazione della nuvola integrata.

Conclusioni

Il lavoro presentato, chiaramente identificabile all'interno di una metodologia *Scan To BIM*, è il risultato dell'adozione di un protocollo di rilievo integrato che ingloba dati tridimensionali derivanti da diverse tecniche e tecnologie strumentali diventate un requisito indispensabile nel settore *Architecture, Engineering & Construction* (AEC) e altresì in quello dei Beni Culturali.

L'ottimizzazione delle tempistiche del lavoro operativo e delle modalità di elaborazione e post-produzione, hanno permesso di soddisfare al contempo i requisiti di qualità informativo-geometrica del rilievo e di sicurezza preassegnati, evitando la registrazione di informazioni superflue che solitamente causano rallentamenti durante l'esecuzione dei lavori.
Integrazione dei dati, georeferenziazione, segmentazione automatica di nuvole di punti, sono soltanto alcuni degli aspetti operativi che hanno conseguito parametri geometrici accurati dell'edificio, garantendo un valido supporto alla realizzazione del modello parametrico *as-built* accurato.
Non di certo mancano i limiti e le criticità riscontrate dovute sicuramente alla mancanza di un software per la gestione operativa completa del modello, che implicano la conversione, impor-

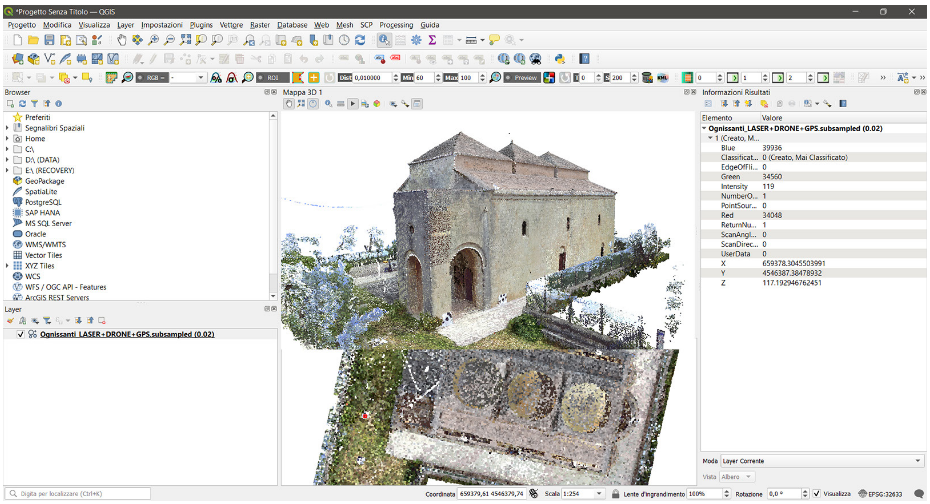


Fig. 9. Gestione della nuvola georeferenziata all'interno di QGIS.

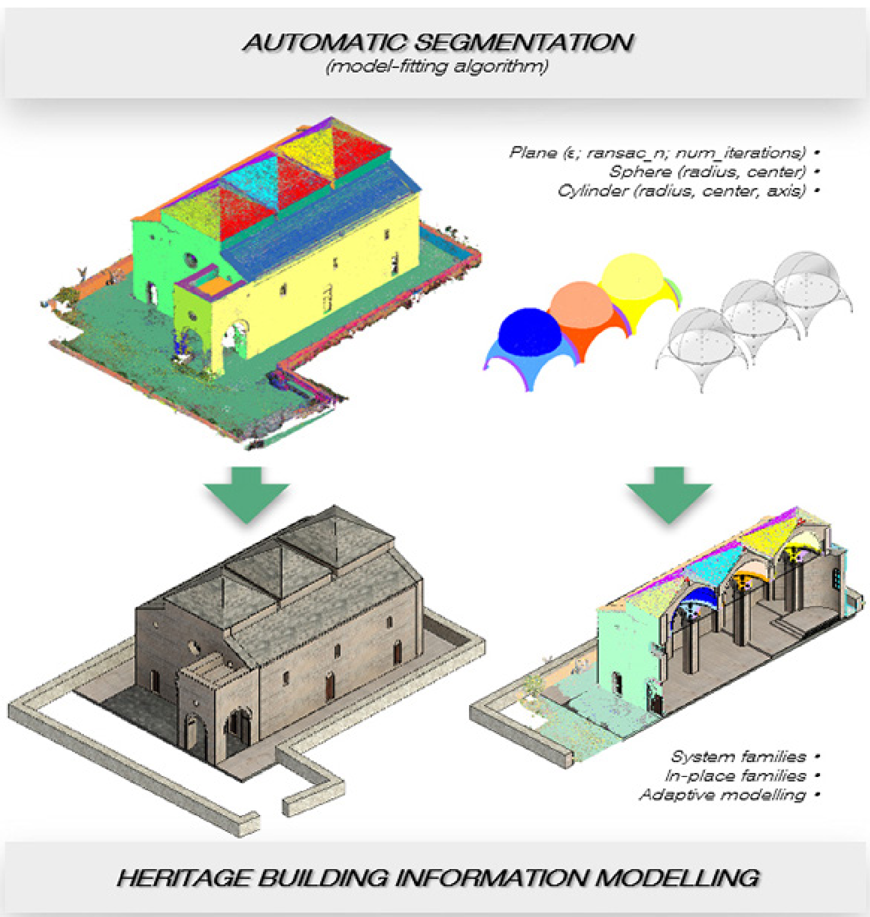


Fig.10. Segmentazione automatica multi-RANSAC e modellazione parametrica HBIM.

tazione ed esportazione dei dati, che spesso possono incidere notevolmente sull'efficienza dei progetti. Tuttavia, validi sono i risultati ottenuti in termini di accuratezza sia del rilievo che della restituzione finale, che dimostrano come opportune scelte metodologiche possano determinare prodotti di grande potenziale per un uso diffuso nei settori sopra citati.

Riferimenti bibliografici

Adami A. Fregonese L., Gallo M., Helder, J., Pepe M., Treccani D. (2019). Ultra light UAV systems for the metrical documentation of Cultural Heritage: applications for architecture and archaeology. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, n. 42, (2/W17), pp. 15-21.

Aryan A., Bosché F., Tang P. (2021). Planning for terrestrial laser scanning in construction: A review. In *Automation in Construction*, n. 125, pp. 1-14.

Biswas H. K., Bosché F., Sun M. (2015). Planning for scanning using building information models: a novel approach with occlusion handling. In *32nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining: Connected to the Future, Proceedings*, pp. 1-8.

Bryan P., Blake B., Bedford J., Barber D., Mills, J. (2009). Historic England. In D. Andrews (Ed.), *Metric Survey Specifications for Cultural Heritage (DGO-Digi)*. Liverpool University Press, Historic England.

Croce V., Caroti G., Piemonte A. Bevilacqua M. G. (2021). From survey to semantic representation for Cultural Heritage: The 3D modelling of recurring architectural elements. In *Acta IMEKO*, n. 10 (1), pp. 98-108.

Di Giulio R., Maietti F., Piaia E., Medici M., Ferrari F., Turillazzi B. (2017). Integrated data capturing requirements for 3D semantic modelling of Cultural Heritage: The Inception protocol. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives,* 42 (2W3), pp. 251-257.

Edl M., Mizerák M., Trojan J. (2018). 3D laser scanners: history and applications. In *International Scientific Journal about Simulation*, n. 4, issue 4, pp. 1-5.

Grilli, E., Menna, F., Remondino, F. (2017). A review of point clouds segmentation and classification algorithms. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, n. 42 (2W3), pp. 339-344.

Neeraj S., Balasubramanian M. (2015). Assessment of Risk in Construction Industry. In *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, n. 2, issue 1, pp. 68-72.

Nguyen, A., Le B. (2013). 3D Point Cloud Segmentation: A survey. In *6th IEEE Conference on Robotic, Automation and Mechatronics (RAM),* n. 8, pp. 5-10.

Rajesh & Keshav V. (2022). Risk Assessment in Building Construction Projects. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, pp. 1-7.

Rifandi R., Ningtya Y. D. W. K., Assagaf S.F. (2013). An Insight About GPS. In *Utrecht University Summer School 2013*, August, pp. 1-12.

Schnabel R., Wahl R., Klein R. (2007). Efficient RANSAC for point-cloud shape detection. In *Computer Graphics Forum*, n. 26, issue 2, pp. 214-226.

Schuhmacher S., Böhm J. (2005). Georeferencing of terrestrial laserscanner data for applications in architectural modeling. In *Proceed. of the ISPRS Working Group V/4 Workshop 3D-ARCH ,Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures'* pp. 1-7.

Stylianidis E. (2019). CIPA – Heritage Documentation: 50 Years: Looking Backwards. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W14, pp. 1-130.

Yang S., Xu S., Huang W. (2022). 3D Point Cloud for Cultural Heritage : A Scientometric Survey. In *Remote Sensing*, n. 14, pp. 1-25.

Autori
Cesare Verdoscia, Politecnico di Bari, cesare.verdoscia@poliba.it
Michele Buldo, Politecnico di Bari, michele.buldo@poliba.it
Riccardo Tavolare, Politecnico di Bari, riccardo.tavolare@poliba.it
Elena Cabrera-Revuelta, Universidad de Cádiz, elena.cabrera@uca.es
Antonella Musicco, Politecnico di Bari, antonella.musicco@poliba.it

Per citare questo capitolo: Verdoscia Cesare, Buldo Michele, Tavolare Riccardo, Cabrera-Revuelta Elena, Musicco Antonella (2023). *Sensor Data Fusion* per i processi *Scan to BIM*. La Chiesa Ognissanti di Valenzano, Bari/Sensor Data Fusion for Scan to BIM Processes. The All Saints' Church in Valenzano, Bari. In Cannella M., Garozzo A., Morena S. (a cura di). *Transizioni. Atti del 44° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Transitions. Proceedings of the 44th International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 3260-3277.

 Isbn 9788835155119

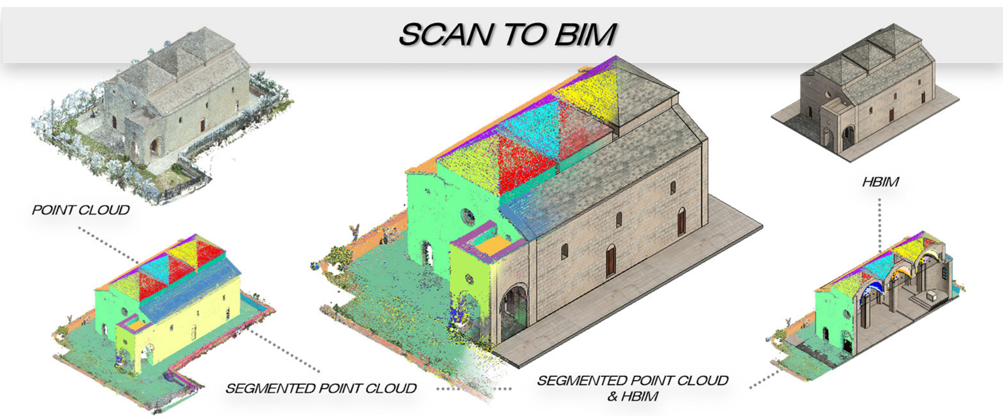
Sensor Data Fusion for Scan to BIM Processes. The All Saints' Church in Valenzano, Bari

Cesare Verdoscia
Michele Buldo
Riccardo Tavolare
Elena Cabrera-Revuelta
Antonella Musicco

Abstract

The field of Cultural Heritage, and specifically the architectural one, is undergoing a digital transition that is being fueled by a trend toward cutting-edge techniques and technologies that permit both the optimisation and management of the data acquisition process in accordance with user needs, as well as the digitisation, conservation, and enhancement of artefacts.
This work is the outcome of ongoing efforts to adopt a single protocol that was tested during the architectural survey of the All Saints' Church of Cuti in Valenzano, an abbey with a typical 11th-century Benedictine-monastic layout.
The combination of data from various measurement technologies (laser scanning, photogrammetry, GNSS), as well as their management during the processing phases, were made possible by developing a Scan-to-BIM methodology – the drafting stages being preceded by a careful and conscious planning of the survey, with the aim of operating in complete safety in the work site.
Processes such as subsampling, georeferencing with Ground Control Points, and automatic point cloud segmentation using model-fitting algorithms have been found to be a significant and reliable support for parametric modelling in HBIM, satisfying the pre-assigned requirements for geometrical and informational quality.

Keywords
Sensor Data Fusion, Health & Safety, Point cloud, Automatic segmentation, Scan to BIM



Scan to BIM methodology in Cultural Heritage.

doi.org/10.3280/oa-1016-c466

Introduzione

The multifarious nature of historic buildings demands a wide range of surveying techniques. Such approaches are required to provide the most comprehensive information, with respect to the geometric complexity of the buildings and the amount of detail required by design needs, while being flexible as to the current status of the site.
In the field of digital technologies based on LiDAR and CRP (Close Range Photogrammetry) systems, significant progress has been made in terms of accuracy, resolution, and reliability of the data collected, as they enable three-dimensional reconstructions in the form of point clouds, providing efficient support for digital archiving and further analysis.
Plenty of research studies on the use of several tools, including professional and non-professional cameras, Unmanned Aerial Vehicle (UAV) systems [Adami et al. 2019, pp.15-21], and laser scanners [Edl et al. 2018, pp.1-5] have been done in the literature, promoting the usage of them even among non-expert operators.
Due to the complexity of historical artefacts and the broad spectrum of contexts in which they appear, an integrated approach between many different sensors is preferred [Yang et al. 2022, pp. 1-25].
It necessitates the fusion of all data from various acquisition sources into a common coordinate system through a georeferencing process [Rifandi et al. 2013, pp. 1-12; Schuhmacher, Böhm 2005, pp. 1-7], introducing significant advantages over recording in an arbitrary local coordinate system.
Common coordinate systems may include national, international or global coordinate systems such as the Global Navigation Satellite System (GNSS), which was developed from the 1984 World Geodetic System (WGS84: World Geodetic System 1984) and is used for geolocation and navigation.
Given the large size, complexity and variety of point clouds, which depends on the surveyed object, in density, point distribution, RGB values, etc., for the analysis and extraction of the data of interest (architectural components, sections, etc.) the use of automatic algorithms is preferable to lengthy and occasionally inaccurate manual annotation procedures [Nguyen, Le 2013, pp. 5-10].
The ones that use Machine Learning algorithms [Grilli et al. 2017, pp. 339-344] and favour automated segmentation, classification of model components or mathematical systems such as RANSAC [Schnabel et al. 2007, pp. 214-226] that allow the extraction of geometric shapes from point clouds by assimilation to primitive shapes (planes, cylinders, spheres, etc.) – are currently the most popular.
Information systems have become increasingly used in recent years to record, archive, and analyse the architectural heritage. As it enables a multidisciplinary workflow capable of optimising the consumption of resources, costs, and time while using flexible and customisable tools [Croce et al. 2021, pp. 98-108] and includes the computerisation of objects through parameters, the Historic Building Information Modelling (HBIM) approach puts itself forth as a new paradigm for the three-dimensional representation and management of the entire life cycle of buildings.
The study of the All Saints' Church of Cuti in Valenzano, Bari (Apulia, Italy) – the last standing building of a significant 11th-century Benedictine abbey, whose layout is identifiable by the succession of three domed volumetric modules in the axis of the nave (fig. 1) – provides an application solution to the research's theme of integrated survey and BIM modelling in the field of built heritage.

Methodology

Rarely is an accurate instrumental survey performed with a single sensor system when digitising complex architectures. It is common practice to combine multiple measurements from various sensors and stations through a technique known as Sensor Data Fusion.
The adopted approach, which is centred on the processing of an integrated survey with the

goal of realising a model in an H-BIM environment, has been methodologically developed based on international procedures [Bryan et al. 2009; Di Giulio et al. 2017, pp. 251-257; Stylianidis 2019, pp. 1-130] defining various application levels that covered aspects related to planning, security, data acquisition, processing, and export, as well as modelling (fig. 2).

Survey planning

Following the identification of the project's criteria and objectives, the cognitive surveys were developed, and various quality indicators were used to define the amount of information depth and morphometric correctness of the data: the LOA (Level of Accuracy), i.e., the tolerance (in mm) of the measurement; the LOD (Level of Detail), i.e., the minimum size (in mm2) of the surveyed elements, related to the density of the point cloud [Aryan et al. 2021, pp. 1-14]; and the LOC (Level of Completeness), i.e., the percentage of the surveyed area [Biswas et al. 2015, pp. 1-8].



Fig. 1. The All Saints' Church of Cuti in Valenzano, Bari (Apulia, Italy).

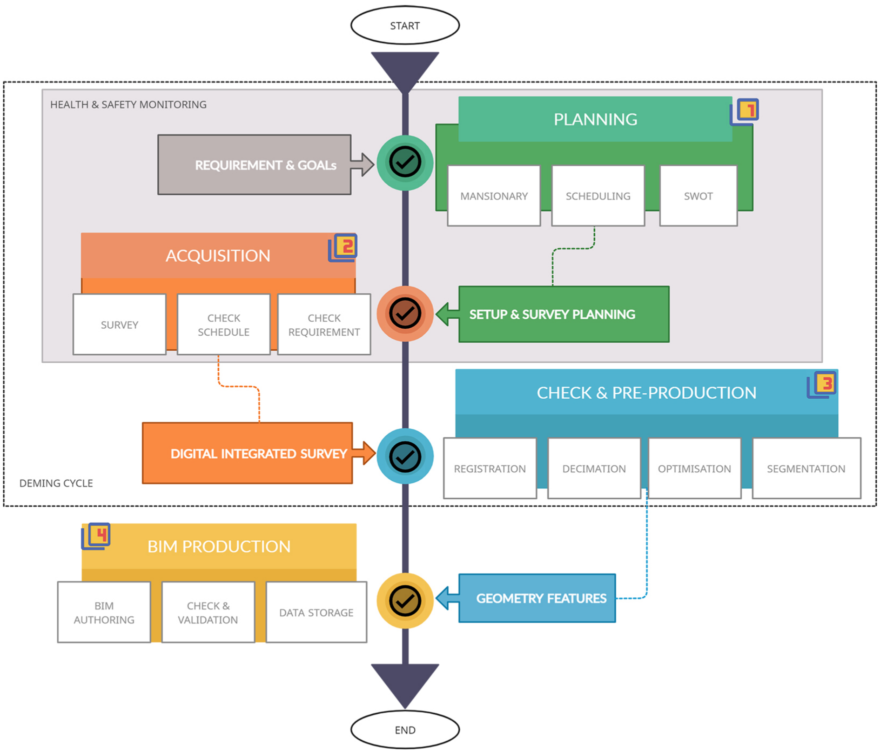


Fig. 2. *Operational workflow.*

Using a variety of equipment, namely a terrestrial laser scanner (range-based methodology), aerial photogrammetry from a drone (image-based methodology), and a GNSS survey (sensor-driven approach), a comprehensive and integrated survey of the building (perimeter 125 m, area 825 m2) was planned (fig. 3).
More precisely, the camera positions were defined in line with the geometries of the spaces and elements (closed/open, concave/convex), given the instrument's operating characteristics, the acquisition angle, and the fundamental criteria for reducing shadow zones, using a CAM2® FARO Focus 3D 120 laser scanner.
The ideal weather and natural illumination needed to perform the photogrammetric survey were predicted closest to the middle hours of cloudy days using a DJI Spark drone (12 MPx camera). Three flights were scheduled, one each for single grid nadiral shots, 45° shots moving in a circle, and 30° shots around the outside of the building.
A topographic survey using a Tersus Oscar GNSS receiver was conducted for georeferencing.

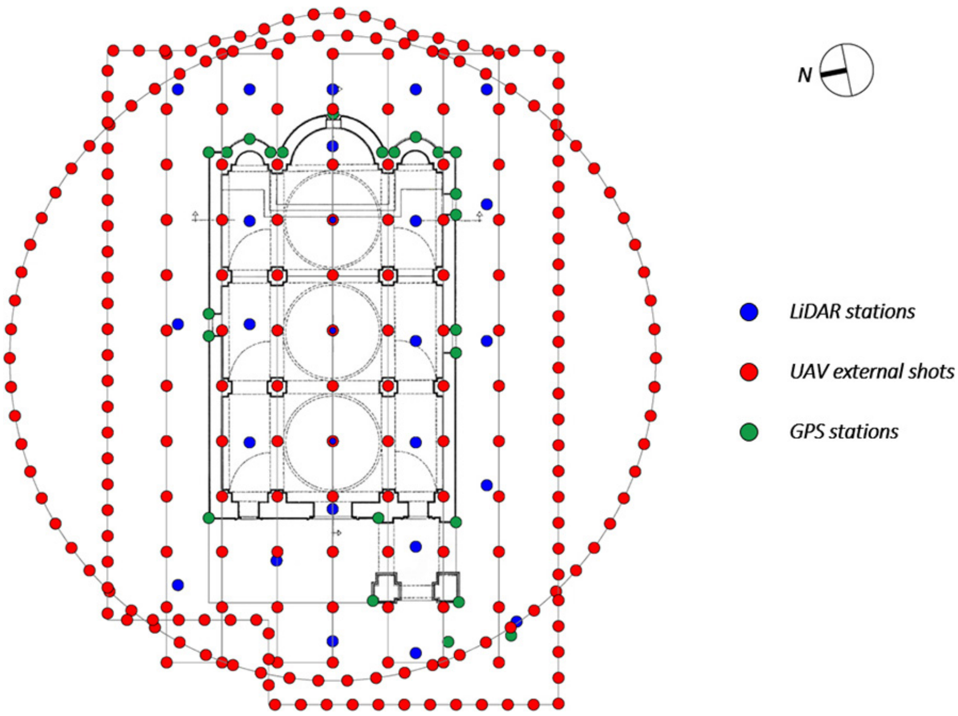


Fig. 3. Survey planning with LiDAR, UAV, and GPS equipment.

Health & safety

The Risk Assessment phases, which analyse dangers for all site and construction operations, may include survey activities. Beyond ensuring the safety of the operators involved, the significance of such an approach can have an impact on the budget and, more broadly, the quality of products and processes [Neeraj, Balasubramanian 2015, pp. 68-72].
The survey campaign may be compared to a complex and dynamic working environment where the activities' vulnerabilities and predetermined conditions alter [Rajesh, Keshav, 2022, pp. 1-7] and where coordination tools are required to enable their optimal arrangement.
The necessary cognitive inspection of the surveying site areas led to the identification of criticalities and contextual interferences, both in terms of plant engineering and infrastructure, as well as an evaluation of the structure's accessibility and usability, along with its architectural and constructive features.
A schedule was developed for the operators to use when planning integrated survey operations with the aim of optimising both natural and artificial lighting conditions, cutting working time, stabilising contextual characteristics in terms of safety, and facilitating the positioning of targets and the identification of noteworthy points (tab. 1).

In this specific scenario, the area ended up being sufficiently confined and safe – thanks to a perimeter fence – for all laser survey and drone overflight operations, for which the safety and assessment procedures outlined in the Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947 and later amendments were adopted. A constant search for any NOtice To AirMen (NOTAM) signals and use of thematic maps were both carried out in this regard (fig. 4).

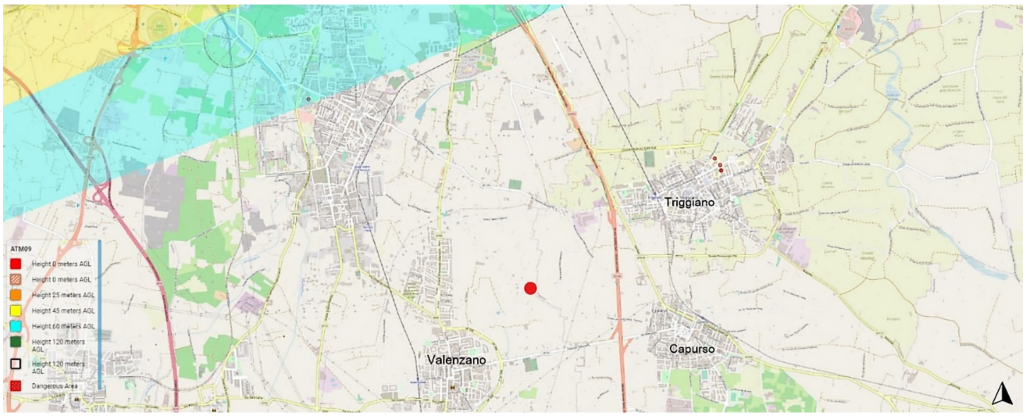


Fig. 4. Airspace map highlighting flight limitations.

Tab. 1. Planning of synchronous survey activities.

STEP	TEAM 1	TEAM 2
1	Rilievo fotografico esterno	Rilievo fotografico interno
2	Rilievo laser interno	Rilievo fotogrammetrico aereo
3	Rilievo laser esterno	Rilievo GNSS/GPS

Data acquisition

The photographic survey, field notes, and the placement of targets and artificial lighting sources proceeded before the surveying operations.
Notably, 26 stations were planned for laser scanning, consisting of 15 external stations with a dimensional resolution of 28.2 Mpts and an acquisition resolution of 7,670 mm/10 m and 11 internal stations with 11 Mpts and 12,272 mm/10 m.
A horizon-weighted metering close to the openings and a balanced one outside served as means to determine the scanning exposure, depending upon the ambient light configuration.
Twenty-four ground control points (GCPs) were measured with a GPS receiver, some of them at targets associated with geographic coordinates in the WGS84 geodetic reference system (EPSG:4326), in decimal degrees (latitude, longitude), with the addition of the ellipsoid height. A total of 240 shots (12 MPx) in JPEG format were taken with the drone

Data processing

By manually registering aligned scan pairs via homologous points, the LiDAR data processing was carried out using the Autodesk Recap Pro® software.
The cloud was cleansed of unnecessary points totalling 145.7 Mpts and referenced to a local coordinate system for integration with photogrammetric data, while no initial decimation filters were applied. With the use of Agisoft Metashape Pro, the aforementioned photogrammetric data were subsequently processed so as to scale the model and georeference it in the WGS84 geodetic system (EPSG:4326), by placing a set of markers in accordance with the points measured with the GPS receiver.
An average accuracy value of 0.03 m emerged for the points of the entire model (fig. 5) as a result of some GCPs being converted into quality control points (QCPs).
Through targetless registration with three homologous points, the photogrammetric point cloud (fig. 6) was later combined with the LiDAR data using the Autodesk Recap Pro® software.

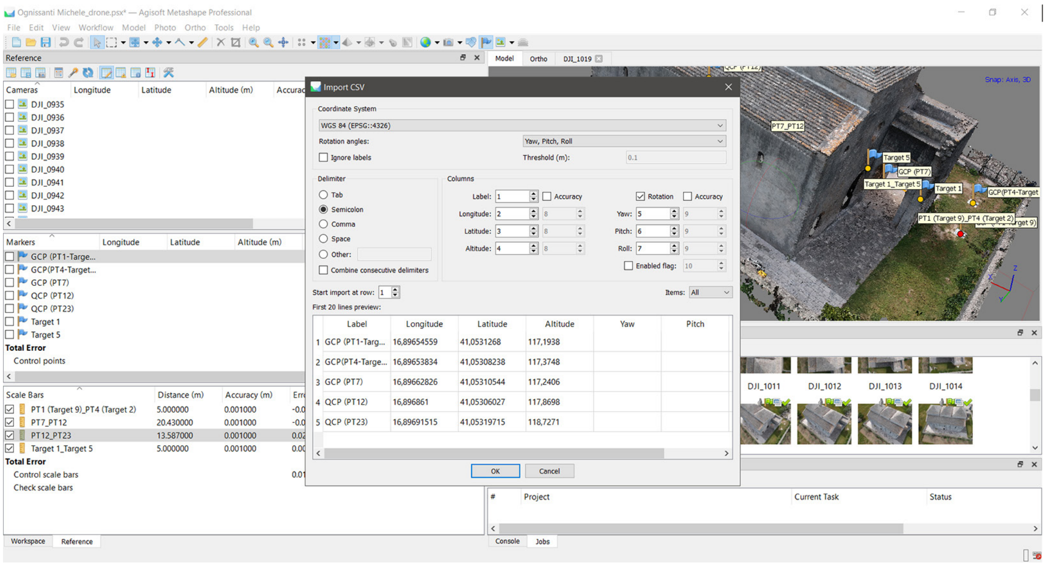


Fig. 5. GPS geographic coordinates input and data optimisation with GCPs and QCPs.

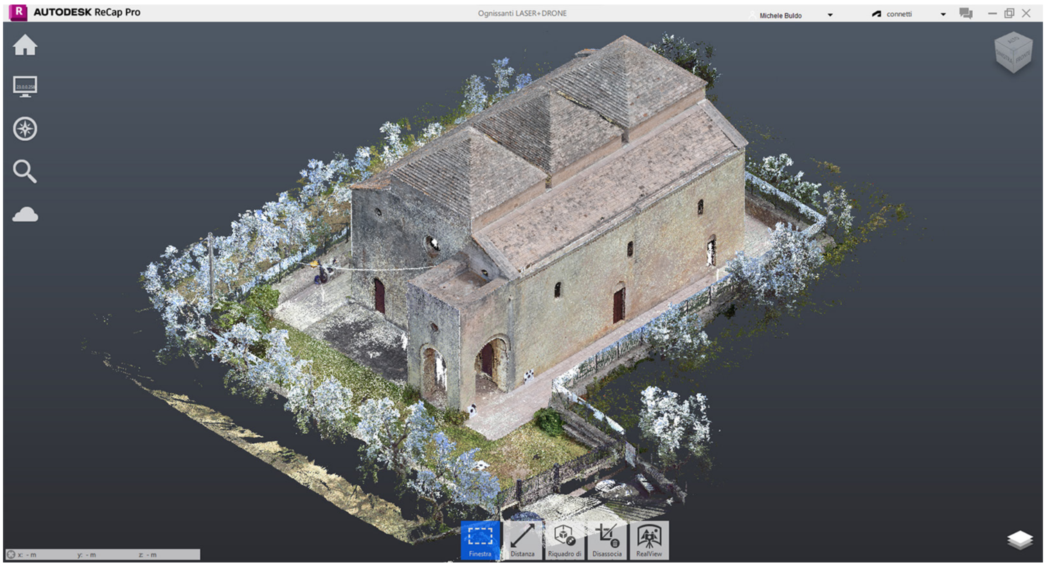


Fig. 6. Integrated point cloud: LiDAR and photogrammetric data.

With the aim to locate the church in EPSG:32633 – WGS 84 / UTM zone 33N, the GPS data's geographic coordinates were afterwards transformed into UTM projected coordinates (fig. 7). The CloudCompare software was used to georeference the range/image-based data by means of the GCPs as reference points (fig. 8).

Export and BIM Authoring processes

Decimation, filtering, and point cloud segmentation procedures were applied to optimise the processed data for their intended purpose in relation to the representative configuration of the content (graphic and colour settings, etc.) and file format (.RCP, .RVT, .FBX, .OBJ, .LAS, .JPEG, ecc.). As a way to facilitate visualisation, organisation, and potential analysis in a GIS (Geographic Information System) environment within satellite maps, the georeferenced point cloud was first subsampled in a point-to-point distance interval of 0.02 m and imported in.LAS format in the open-source software QGIS® (fig. 9).
By applying a Scan to BIM methodological approach, the parametric HBIM model was to be created during one of the final processing stages.

Using multi-RANSAC type algorithms (in PythonTM language), automatic segmentation operations of the point cloud were carried out for the recognition of flat and curving walls, floors, and vaulted structures as references for the adaptive parametric families used for the development of the model (Fig. 10).
Three specific variables were taken into account for the flat elements: i) the value of the maximum distance (distance threshold) between the inliers and the ideal shape; ii) the number of points sampled (ransac_n); iii) the number of iterations (num_iterations). On the other hand, spherical ideal geometries (centre and radius parameters) and cylindrical rotation surfaces (centre, radius and rotation axis np.array (1,3)) were used for the outliers found on the vaulted structures and curving walls.
The next step was to import the segmented point clouds into the Autodesk Revit® modelling software, allowing them to be better managed and visualised, thus optimising the computational speed during the processing phase.
System and local families were chiefly used for the greater part of the architectural and structural components. As a way to reconstruct the masonry vaults, customised parametric families (.rfa) were built by using adaptable components – joined via splines or reference lines to define and fit the geometry of the vaulted structure to the point cloud.

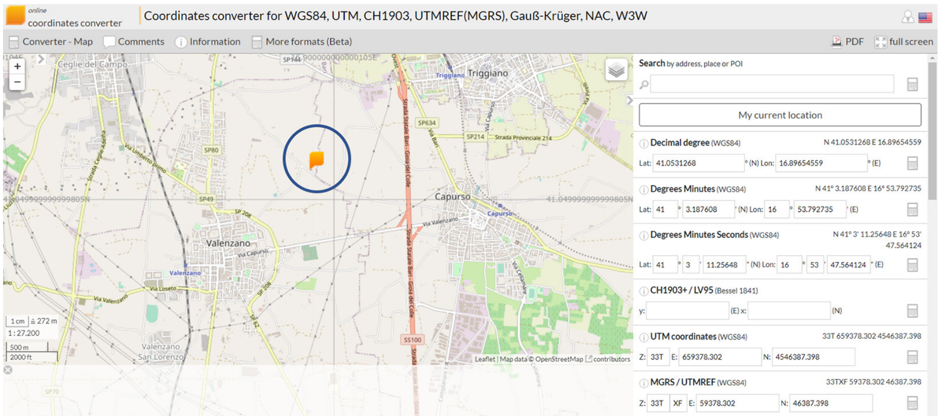


Fig. 7. Geographic coordinate conversion into UTM projected coordinates and visualisation in OpenStreetMap.

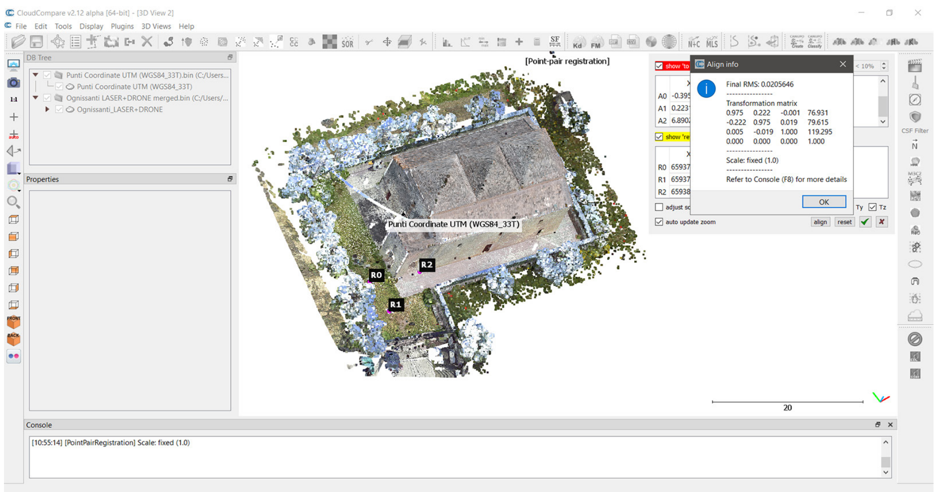


Fig. 8. Georeferencing of the integrated point cloud.

Conclusions

The presented work, which can be readily identified within a Scan To BIM methodology, is the outcome of the adoption of an integrated survey protocol that combines three-dimensional data produced from several instrumental techniques and technologies that have become crucial issues in the Architecture, Engineering & Construction (AEC) sector as well as in the Cultural Heritage domain.

It was possible to fulfil the pre-assigned standards of survey information-geometric quality and safety while saving time by optimising operational work scheduling, processing, and post-production procedures, as well as avoiding the recording of unnecessary information that typically causes delays during the execution of the work.

Data fusion, georeferencing, and automatic point cloud segmentation are just a few of the operational aspects which made it possible to properly parametrise the structure's geometry, hence providing important assistance for the creation of an accurate as-built parametric model. Due to the lack of specialised and customised software for a comprehensive operational

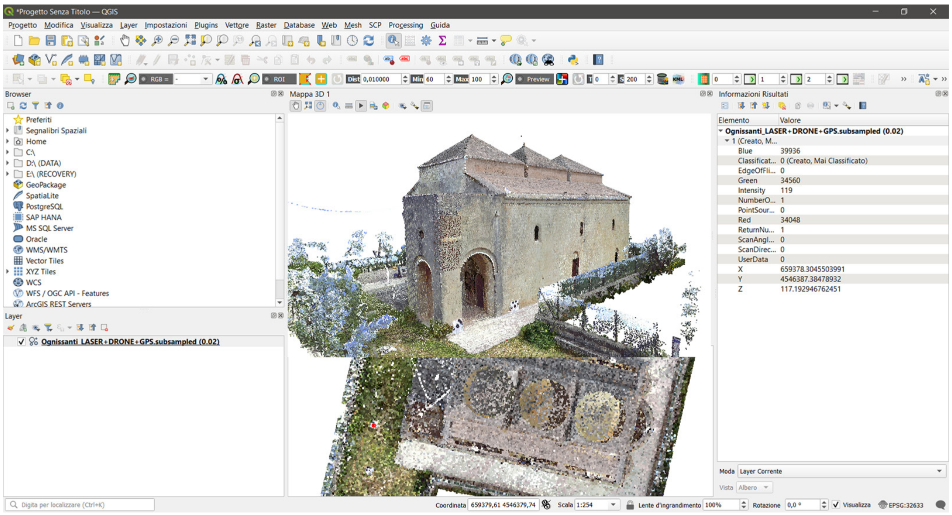


Fig. 9. Management of the georeferenced cloud within QGIS.

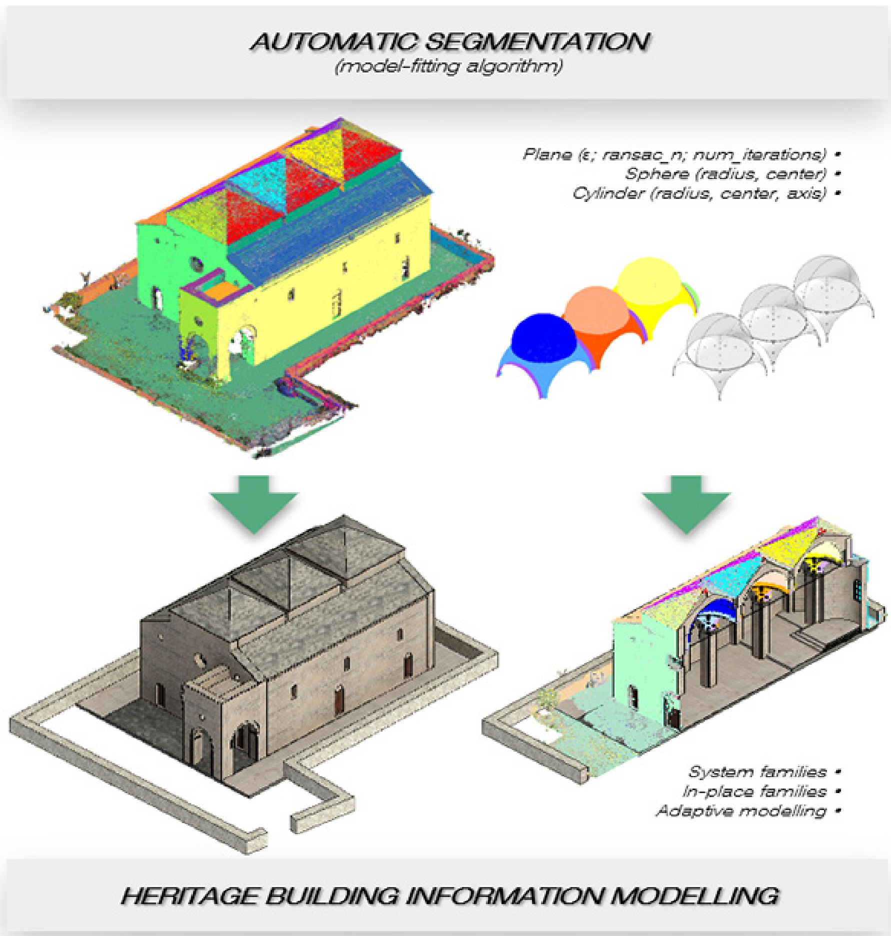


Fig.10. Multi-RANSAC automatic segmentation for HBIM.

administration of the model, the limitations and flaws of the model, which include data translation, import/export, and frequently have significant consequences on the effectiveness of the products, are unavoidable.
Nevertheless, both in terms of the final graphic output and of the survey, the results obtained are valid in terms of accuracy, and they reveal how proper methodological procedures might identify products with a substantial chance of being used in the aforementioned sectors.

References

Adami A. Fregonese L., Gallo M., Helder, J., Pepe M., Treccani D. (2019). Ultra light UAV systems for the metrical documentation of Cultural Heritage: applications for architecture and archaeology. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, No. 42, (2/W17), pp. 15-21.

Aryan A., Bosché F., Tang P. (2021). Planning for terrestrial laser scanning in construction: A review. In *Automation in Construction*, No. 125, pp. 1-14.

Biswas H. K., Bosché F., Sun M. (2015). Planning for scanning using building information models: a novel approach with occlusion handling. In *32nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining: Connected to the Future, Proceedings*, pp. 1-8.

Bryan P., Blake B., Bedford J., Barber D., Mills, J. (2009). Historic England. In D. Andrews (Ed.), *Metric Survey Specifications for Cultural Heritage (DGO-Digi)*. Liverpool University Press, Historic England.

Croce V., Caroti G., Piemonte A. Bevilacqua M. G. (2021). From survey to semantic representation for Cultural Heritage: The 3D modelling of recurring architectural elements. In *Acta IMEKO,* No. 10 (1), pp. 98-108.

Di Giulio R., Maietti F., Piaia E., Medici M., Ferrari F., Turillazzi B. (2017). Integrated data capturing requirements for 3D semantic modelling of Cultural Heritage: The Inception protocol. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42 (2W3), pp. 251-257.

Edl M., Mizerák M., Trojan J. (2018). 3D laser scanners: history and applications. In *International Scientific Journal about Simulation,* No. 4, issue 4, pp. 1-5.

Grilli, E., Menna, F., Remondino, F. (2017). A review of point clouds segmentation and classification algorithms. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, No. 42 (2W3), pp. 339-344
.
Neeraj S., Balasubramanian M. (2015). Assessment of Risk in Construction Industry. In *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, No. 2, issue 1, pp. 68-72.

Nguyen, A., Le B. (2013). 3D Point Cloud Segmentation: A survey. In *6th IEEE Conference on Robotic, Automation and Mechatronics (RAM)*, No. 8, pp. 5-10.

Rajesh & Keshav V. (2022). Risk Assessment in Building Construction Projects. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* pp. 1-7.

Rifandi R., Ningtya Y. D. W. K., Assagaf S.F. (2013). An Insight About GPS. In *Utrecht University Summer School 2013*, August, pp. 1-12.

Schnabel R., Wahl R., Klein R. (2007). Efficient RANSAC for point-cloud shape detection. In *Computer Graphics Forum*, No. 26, issue 2, pp. 214-226.

Schuhmacher S., Böhm J. (2005). Georeferencing of terrestrial laserscanner data for applications in architectural modeling. In *Proceed. of the ISPRS Working Group V/4 Workshop 3D-ARCH 'Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures',* pp. 1-7.

Stylianidis E. (2019). CIPA – Heritage Documentation: 50 Years: Looking Backwards. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W14, pp.1-130.

Yang S., Xu S., Huang W. (2022). 3D Point Cloud for Cultural Heritage : A Scientometric Survey. In *Remote Sensing,* No. 14, pp. 1-25.

Authors
Cesare Verdoscia, Politecnico di Bari, cesare.verdoscia@poliba.it
Michele Buldo, Politecnico di Bari, michele.buldo@poliba.it
Riccardo Tavolare, Politecnico di Bari, riccardo.tavolare@poliba.it
Elena Cabrera-Revuelta, Universidad de Cádiz, elena.cabrera@uca.es
Antonella Musicco, Politecnico di Bari, antonella.musicco@poliba.it

To cite this chapter: Verdoscia Cesare, Buldo Michele, Tavolare Riccardo, Cabrera-Revuelta Elena, Musicco Antonella (2023). Sensor Data Fusion per i processi Scan to BIM. La Chiesa Ognissanti di Valenzano, Bari/Sensor Data Fusion for Scan to BIM Processes. The All Saints' Church in Valenzano, Bari. In Cannella M., Garozzo A., Morena S. (eds.). *Transizioni. Atti del 44° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Transitions. Proceedings of the 44th International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 3260-3277.

 Isbn 9788835155119